

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ИОНОВ EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LASER-DRIVEN ION ACCELERATION

*К. В. Сафронов, В. А. Флегентов, С. А. Горохов, Д. С. Гаврилов, А. Г. Какишин,
Е. А. Лобода, Д. А. Вихляев*
*K. V. Safronov, V. A. Flegentov, S. A. Gorokhov, D. S. Gavrilov, A. G. Kakshin,
E. A. Loboda, D. A. Vikhlyayev*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина»

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics

Для повышения эффективности лазерного ускорения тяжелых ионов был разработан in-situ метод очистки мишеней излучением лазера непрерывного действия. На пикосекундной установке проведены эксперименты по ускорению ионов из нагретых лазерным излучением танталовых и титановых фольг толщиной ~1 мкм. В экспериментах были зарегистрированы ионы кислорода и углерода с энергиями свыше 5 МэВ/нуклон, а также ионы тантала с энергиями до 0,26 МэВ/нуклон. Проведены эксперименты по ускорению дейтронов из нагретых фольг TiD₂. Метод генерации пучков дейтронов может быть использован для ускорения ионов трития.

A method of target cleaning by continuous wave laser was developed to increase effectiveness of laser-driven heavy ion acceleration. Experiments on ion acceleration from heated titanium and tantalum foils of 1 μm thickness were conducted on a picosecond laser facility. Oxygen and carbon ions with energies of more than 5 MeV/nucleon, tantalum ions with energies up to 0.26 MeV/nucleon were detected. In addition experiments on deuteron acceleration from heated TiD₂ foils were carried out. This method can be used to accelerate tritium ions.

Введение

Ускорение протонов ультракороткими лазерными импульсами активно изучается во многих исследовательских лабораториях на протяжении более 10 лет. Научный интерес связан, прежде всего, с возможностью создания компактных ускорителей для медицинских применений [1], «быстрого поджига» термоядерных мишеней [2], генерации быстрых нейтронов [3] и других.

Наиболее изученным и чаще всего реализуемым в экспериментах механизмом лазерного ускорения является TNSA (Target Normal Sheath Acceleration) [4]. Ускорение происходит в дебаевском слое, который формируется на тыльной поверхности мишени «горячими электронами», генерирующимися в плазме на облучаемой поверхности. Т. к. ускоряющее поле имеет электростатическую природу, наибольшим темпом ускорения обладают частицы с

максимальным отношением z/A – протоны. Они присутствуют на любой поверхности в составе адсорбированных водяных паров и углеводородных загрязнений. В процессе ускорения протоны, двигаясь на фронте пучка, экранируют ускоряющее поле для более тяжелых ионов. Этот эффект настолько силен, что в экспериментах без применения специальных методов очистки мишеней ускорение тяжелых ионов с $A > 16$ не происходит, либо значительно подавлено [5, 6]. Из-за сложности лазерного ускорения тяжелых ионов экспериментальных работ, посвященных этому процессу, опубликовано очень мало [7–9].

Однако существуют потенциальные применения пучков лазерно-ускоренных ионов, реализация которых возможна уже на современных системах с ультракороткой длительностью импульса. Так для анализа поверхности по упругому рассеянию ионов (ERDA, elastic recoil detection analysis) требуются ионы

с $A \sim 40$, высоким зарядом с энергиями $1 \div 2$ МэВ/нуклон [10]. Для тестирования полупроводниковых устройств на одиночных сбои под действием космического излучения используются тяжелые ионы с энергиями до 10 МэВ/нуклон [11].

В настоящем докладе представлены результаты экспериментов по лазерному ускорению ионов из тонких металлических фольг, проведенных на пикосекундной лазерной установке. Для очистки поверхности от водородсодержащих соединений, препятствующих генерации тяжелых ионов, мишени нагревались излучением лазера непрерывного действия.

1. Нагрев мишеней непрерывным лазерным излучением

Для нагрева мишеней внутри вакуумной камеры установки был применен лазерный модуль непрерывного действия DTL-423-2000 с регулируемой мощностью в диапазоне $0 \div 2$ Вт с длиной волны 1053 нм. Излучение лазерного модуля фокусировалось на мишень в эллиптическое пятно с размерами $\sim (250 \times 300)$ мкм по полувысоте, максимальное значение средней интенсивности в пятне составляло 615 мВт/см². Необходимо отметить, что при рабочем давлении $\sim 10^{-5}$ торр, на любую чистую поверхность внутри мишени камеры садится около 10 молекулярных слоев воды за 1 секунду (при коэффициенте прилипания, близком к единице). Поэтому для предотвращения повторного осаждения загрязнений на поверхность мишени греющий лазер оставался включенным вплоть до момента рабочего выстрела.

Температура нагретых мишеней контролировалась по спектру теплового излучения в диапазоне длин волн ($600 \div 800$) нм. Для этой цели был собран спектрометр на основе призмы из стекла К8.

Спектральное разрешение спектрометра было измерено экспериментально по уширению лазерной линии 1053 нм и составило 10 нм. При восстановлении температуры применялся метод, описанный в работе [12]. Погрешность метода определяется в основном шумами ПЗС-камеры и составляет величину менее 2 % для температур выше 1200 К.

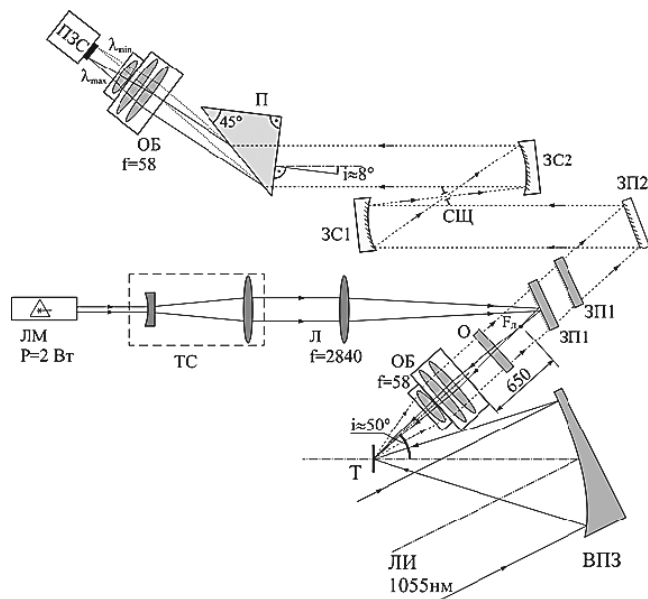


Рис. 1. Оптическая схема метода нагрева мишеней лазерным излучением и спектрографа теплового излучения мишеней

Оптическая схема метода нагрева мишеней и измерения температуры приведена на рис. 1.

2. Эксперименты с фольгами из титана

Для исследования зависимости параметров быстрых протонов от температуры мишеней была проведена серия экспериментов по облучению титановых фольг толщиной 1 мкм. Интенсивность ультракороткого лазерного импульса на мишени в этой серии составляла величину $\sim 10^{19}$ Вт/см².

Для регистрации протонов применялся масс-спектрометр Томсона, установленный с тыльной стороны мишени на расстоянии 68 см под углом 9° к нормали. На входе спектрометра была установлена диафрагма диаметром 120 мкм, что соответствует углу обзора $1,7 \cdot 10^{-5}$ ср. В качестве регистрирующего экрана в спектрометре использовались фотолюминесцентные пластины image plate (IP) FUJI BAS-TR без защитного покрытия.

На рис. 2 и 3 представлены зависимости максимальной энергии и выхода быстрых протонов от температуры мишени, полученные по измерениям спектрометром Томсона. Исследования показали, что с увеличением температуры до ~ 1100 К энергия и количество ускоренных протонов линейно снижается, при температурах свыше 1200 К параметры пучка не меняются. При температурах свыше 1400 К мишени начинают разрушаться под действием греющего лазера, поэтому при более

высоких температурах эксперименты не проводились. Таким образом, нагрев мишеней приводит к снижению максимальной энергии протонов на 1 порядок, а углового выхода – более чем на 2 порядка.

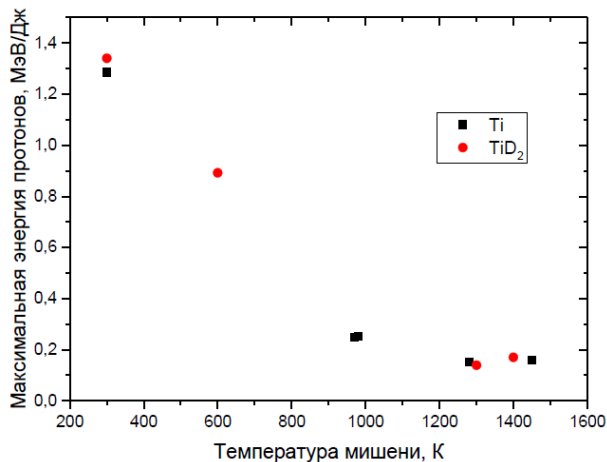


Рис. 2. Зависимость максимальной энергии протонов (нормированной на энергию лазерного импульса) от температуры мишени по измерениям спектрометром Томсона

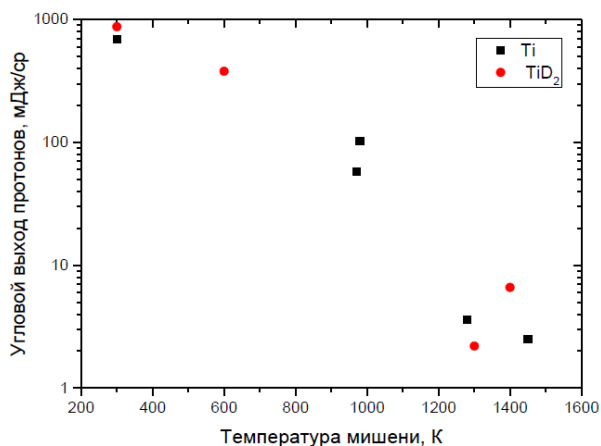


Рис. 3. Угловой выход протонов в зависимости от температуры мишени по измерениям спектрометром Томсона

3 Эксперименты с фольгами из тантала

Для того чтобы исследовать ускорение легких и тяжелых ионов при высоких температурах была проведена серия экспериментов с мишенями из танталовых фольг толщиной 1 мкм. Предварительные исследования показали: предельная тем-

пература, до которой можно нагреть танталовые мишени, составляет 1700 К...1900 К.

В этой серии регистрация ионов также производилась спектрометром Томсона. В качестве экрана спектрометра использовались трековые детекторы CR-39, что позволило повысить пространственное разрешение и, соответственно, улучшить разделение ионных парабол в области высоких энергий.

Первоначально был проведен опыт с мишенью без нагрева. В эксперименте были зарегистрированы ионы углерода и кислорода высокой кратности ионизации C^{6+} , O^{7+} , C^{5+} , O^{6+} и C^{4+} . Спектры, восстановленные посредством подсчета треков под микроскопом, показаны на рис. 4.

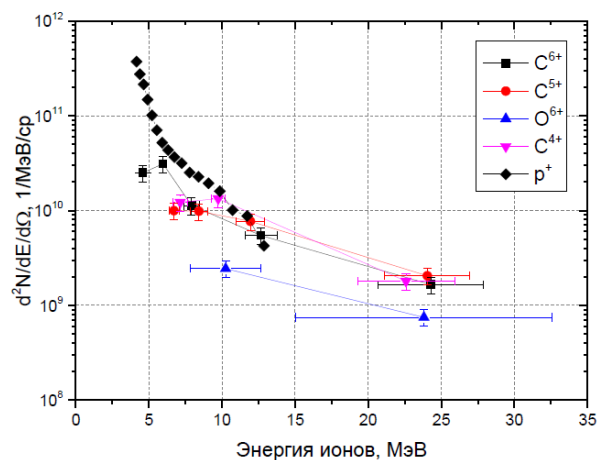


Рис. 4. Энергетическое распределение ионов в эксперименте с танталовой мишенью без нагрева

В следующем опыте мишень была нагрета до температуры (1320 ± 20) К. В сравнении с экспериментом без нагрева, появились ионы с более низкой кратностью ионизации C^{3+} , O^{4+} и O^{3+} ($z/A = 0,25 \dots 0,33$), ускорение которых ранее было подавлено протонами. Количество ионов с высокой кратностью ионизации C^{6+} , C^{5+} , O^{6+} ($z/A = 0,37 \dots 0,5$) снизилось. В области высоких энергий треки этих ионов накладываются, что затрудняет определение их энергии отсечки. Тем не менее, предполагая, что наиболее близкие к вершинам парабол треки образованы ионами углерода C^{4+} , тогда максимальная энергия ионов этого сорта составляет 33,5 МэВ. Максимальная энергия ионов C^{3+} и O^{3+} равна 10,4 МэВ и 10,7 МэВ соответственно.

Ионы тантала были обнаружены при нагреве мишени до температуры 1750 К. В этом эксперименте удалось полностью очистить поверхность мишени от кислородсодержащих загрязнений.

Спектрометром Томсона были зарегистрированы ионы углерода всех степеней ионизации вплоть до C^{+1} ($z/A = 0,17$), а также две параболы с $z/A \approx 0,14$ и $z/A \approx 0,11$, соответствующие ионам ^{181}Ta с зарядом 20 ± 1 и 26 ± 1 . Отметим, что ионы Ta^{21+} и Ta^{27+} обладают заполненными электронными подуровнями. Энергетические распределения зарегистрированных в опыте ионов приведены на рис. 5. На рис. 6 изображен график зависимости максимальной энергии ионов от отношения z/A .

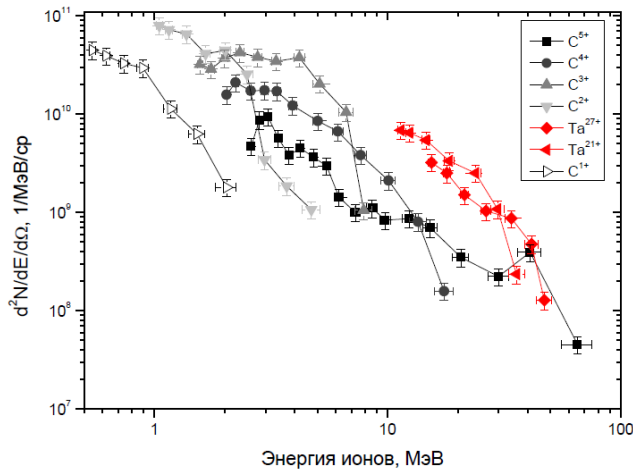


Рис. 5. Энергетические спектры ионов в опыте с танталовой мишенью, нагретой до 1750 К

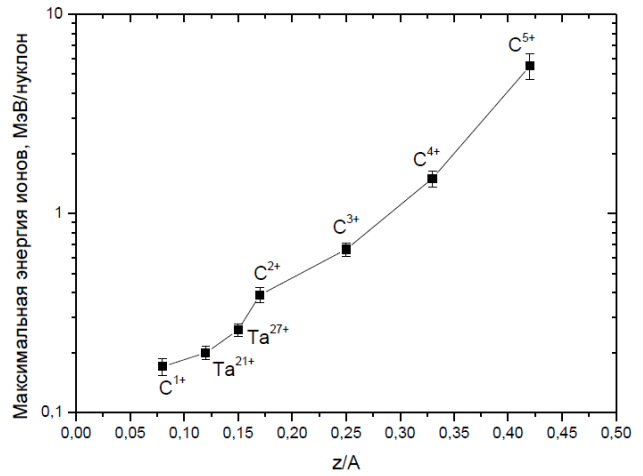


Рис. 6. Максимальная энергия ионов при температуре мишени 1750 К в зависимости от z/A

На рис. 7 приведен график зависимости максимальных энергий ионов от отношения z/A , построенный по результатам нескольких экспериментов с танталовыми мишенями. Сплошной линией показан ход этой зависимости согласно аналитической модели [16]. Из графика следует, что энергии ионов с максимальным зарегистрированным в опыте значением z/A совпадают с предсказанием модели, тогда как энергии ионов с меньшей кратностью ионизации лежат существенно ниже. Если полностью удалить с поверхности мишеней легкие ионы углерода, энергия ионов тантала должна вырасти до энергии, соответствующей предсказаниям модели, т. е. до $\sim 1,5$ МэВ/нуклон.

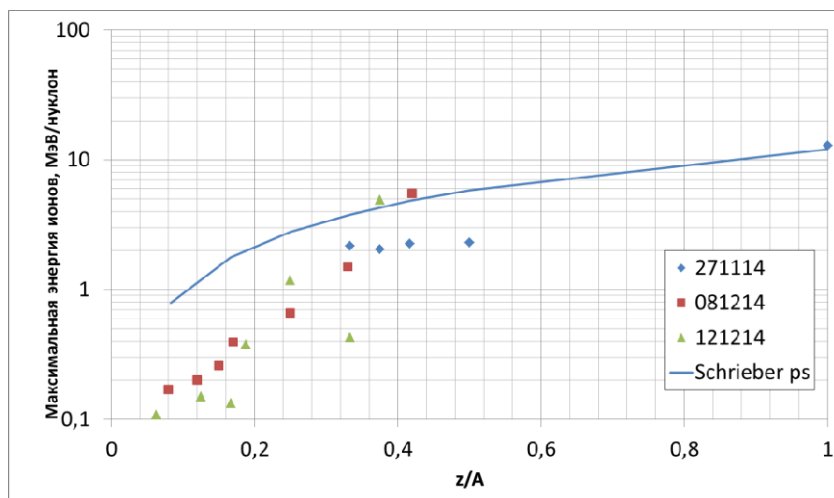


Рис. 7. Максимальные энергии ионов, зарегистрированные в экспериментах с танталовыми мишенями. Сплошная линия проведена согласно модели [16]

4. Эксперименты по ускорению дейтронов

В последнее время был опубликован ряд работ различных исследователей, посвященных лазерному ускорению дейтронов (см., например, [15]). Интерес к генерации этих частиц связан с возможностью их использования для инициирования ядерных (d,n) реакций и создания лазерного источника быстрых нейтронов. Сложность получения пучков быстрых дейтронов заключается в том же, что и при лазерной генерации тяжелых ионов, – поверхностный слой водородсодержащих загрязнений на мишени препятствует ускорению.

На пикосекундной лазерной установке были проведены эксперименты по ускорению дейтронов из фольг TiD_2 толщиной 1 мкм. Для удаления поверхностного слоя загрязнений был применен лазерный нагрев мишеней. В связи с тем, что дейтерид титана подвержен тепловому разложению при температуре 680 K, нагревать мишень до высоких температур нельзя. В этих экспериментах температура мишени была зафиксирована на уровне 600 K.

На рис. 8 приведено изображение с экрана спектрометра Томсона, полученное в одном из

опытов. Парабола, соответствующая $z/A = 1/2$, продолжается дальше энергии поглощения C^{6+} и O^{8+} в фильтре (5 мкм алюминия) (0,58 МэВ/нуклон и 0,59 МэВ/нуклон, соответственно), который располагался перед экраном. Точка окончания параболы точно соответствует пробегу дейтронов в фильтре (~600 кэВ). Для того, чтобы зарегистрировать высокоэнергетичные дейтроны, перед экраном спектрометра Томсона был установлен медный фильтр толщиной 50 мкм. Данный фильтр поглощает ионы углерода с энергиями менее 6,9 МэВ/нуклон, при этом пропускает дейтроны с энергиями более 4,85 МэВ. Спектрограмма этого опыта приведена на рис. 9. Максимальная энергия дейтронов составила 6 МэВ, что вдвое меньше максимальной энергии протонов в этом же опыте 10,1 МэВ. Аналогичное соотношение между энергиями дейтронов и протонов наблюдалось в работе [15].

Спектры дейтронов, восстановленные по двум экспериментам с разными фильтрами, приведены на рис. 10. Спектры протонов, полученные в этих же экспериментах, также изображены на этом графике.

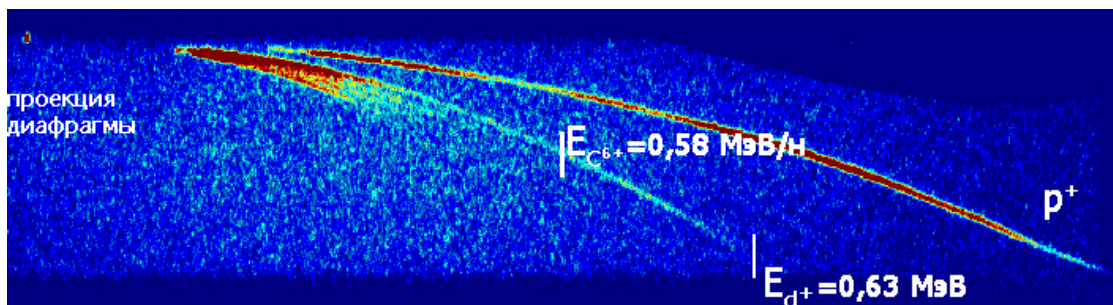


Рис. 8. Изображение ир-детектора спектрометра Томсона в опыте с мишенью из TiD_2 . Температура мишени ~600 K, перед экраном был установлен фильтр из алюминия толщиной 5 мкм

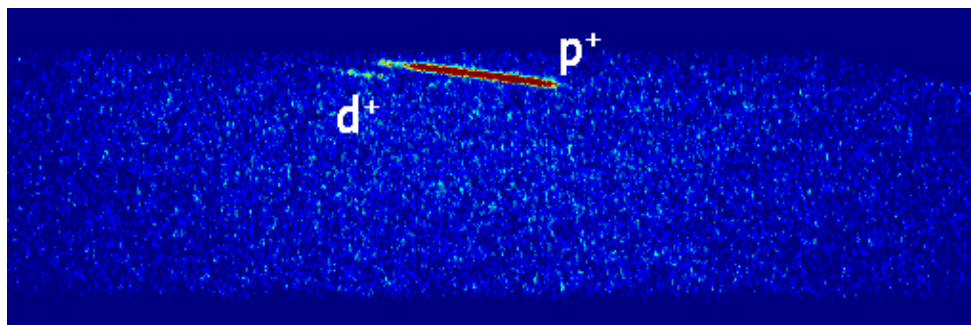


Рис. 9. Спектрограмма, полученная в опыте с мишенью TiD_2 . Температура мишени 600 K, перед экраном спектрометра был установлен медный фильтр толщиной 50 мкм

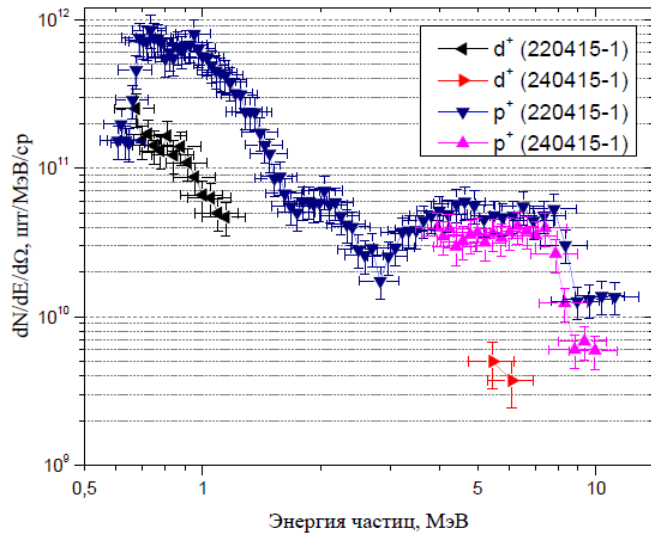


Рис. 10. Энергетические спектры протонов и дейтронов в экспериментах с мишенями TiD_2 , нагреваемыми до 600 К

Суммарная энергия дейтронов составляет 10 % от энергии протонов. В предположении, что угол раствора пучка заряженных частиц 14° , конверсия лазерной энергии в быстрые дейтроны равна 0,04 %.

Заключение

На пикосекундной установке проведены исследования лазерного ускорения ионов из различных мишеней. Нагрев мишеней до температур выше 1200 К перед рабочим выстрелом позволяет снизить энергию быстрых протонов на порядок, а их количество – более чем на 2 порядка. При высоких температурах возрастает эффективность ускорения ионов углерода и кислорода. В опытах зарегистрировано увеличение их энергии более чем в 2,5 раза – до 5 МэВ/нуклон. Были получены ионы тантала высокой кратности ионизации с энергиями вплоть до 47 МэВ. Соответствующий коэффициент линейной передачи энергии для кремния составляет 35 МэВ/мг/см². Это значение практически совпадает с максимальным коэффициентом линейной передачи энергии от вторичных частиц, образуемых протонами из солнечного ветра. Таким образом, мощности лазерной установки достаточно для получения частиц с энергиями, необходимыми для моделирования одиночных сбоев электроники под действием заряженных частиц солнечного ветра. Более того, при полной очистке мишеней от углерода и кислорода, можно

ожидать повышение энергии ионов тантала в экспериментах в ~ 5 раз.

В экспериментах с мишенями из TiD_2 , нагретыми до 600 К, были зарегистрированы дейтроны с энергиями до 6 МэВ, энергия пучка частиц составила 0,04 % энергии лазерного импульса. Применение в качестве мишеней фольг из TiT_2 позволит ускорять ионы трития.

Список литературы

1. Tajima T., Habs D., and Yan X. Q. Rev. Acc. Science Technol. 2009. 2, 201.
2. Roth M., Cowan T. E., Key M. H. *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86, 2001. 436.
3. Roth M. *et al.*, Bright Laser-Driven Neutron Source Based on the Relativistic Transparency of Solids, Phys. Rev. Lett. 2013. 110, 044802.
4. Hatchett S. P. *et al.*, Electron, photon, and ion beams from the relativistic interaction of Petawatt laser pulses with solid targets, Phys. Plasmas, 2000. 7, 2076.
5. Сафронов К. В., Бессараб А. В., Вихляев Д. А. и др. Экспериментальное исследование характеристик ионных пучков, ускоряемых при облучении тонких мишеней из различных материалов ультракороткими лазерными импульсами. Забыхинские научные чтения, 15–19 марта 2010 г. – Снежинск (2010).
6. Hegelich B. M., Albright B. J., Cobble J. *et al.*, Nature, 2006. 439, 441.
7. Allen M. *et al.*, Direct Experimental Evidence of Back-Surface Ion Acceleration from Laser-Irradiated Gold Foils, Phys. Rev. Lett. 2004. 93, 265004.
8. Hegelich M. *et al.*, Phys. Rev. Lett. 2002. 89, 085002.
9. Braenzel J. *et al.*, Coulomb-Driven Energy Boost of Heavy Ions for Laser-Plasma Acceleration, Phys. Rev. Lett. 114, 124801 (2015).
10. Gusinskii G. M., Kudryavtsev I. V., Kudoyarova V. Kh., Naidenov V. O. and Rassadin L. A. A method for investigation of light-element distribution in the surface layers of semiconductors and dielectrics, Semicond. Sci. Technol. 7, 881-887 (1992).
11. Thieberger P., Stassinopoulos E. G., Gunten V., Zajic V. Heavy-ion beams for single-event research at Brookhaven – present and future, NIM Sect. 1991. B 56, 1251–1255.
12. D. Ng and G. Fralick, Use of a multiwavelength pyrometer in several elevated temperature aerospace applications, Rev. Sci. Instrum., 2001. 72, 1522.

13. Mančić A., Fuchs J., Antici P., Gaillard S. A. and Audebert P. Absolute calibration of photostimulable image plate detectors used as (0.5–20 MeV) high-energy proton detectors, *Rev. Sci. Instrum.* 2008. 79, 073301.
14. Alejo A., Kar S., Ahmed H. *et al.*, Characterization of deuterium spectra from laser driven multi-species sources by employing differentially filtered image plate detectors in Thomson spectrometers, arXiv:1408.2978v2 [physics.plasm-ph] 14 Sep 2014 (2014).
15. Morrison J. T. *et al.*, Selective deuteron production using target normal sheath acceleration, *Phys. Plasmas*, 2012. 19, 030707.
16. Schreiber J. *et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2006. 97, 045005.